

SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS

Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Inés Tejado, Blas M. Vinagre
Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avenida de Elvas, s/n, (06006) Badajoz
Email: {emilianoph,itejbal,bvinagre}@unex.es

Resumen

En los últimos años se han ido incorporando diferentes tecnologías al ámbito de la ingeniería de la rehabilitación con el objeto de desarrollar sistemas de asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas que se adecúen a sus necesidades y permitan mejorar su calidad de vida. La Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura cuenta con un simulador de movimiento, único en España, que tiene como principal objetivo el diseño y fabricación de este tipo de ayudas técnicas. Este artículo describe el proceso de integración de los equipos disponibles para la creación de mundos virtuales para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas para mejorar, en un futuro, su calidad de vida, así como para ayudar en el diseño de infraestructuras en ciudades más adecuadas a sus limitaciones. A modo de ilustración, se incluye una de las aplicaciones desarrolladas para esta aplicación.

Palabras Clave: ingeniería, rehabilitación, simulador, realidad virtual, discapacidad, silla de ruedas.

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería de la rehabilitación, se considera indispensable que los sistemas de asistencia para la movilidad se adapten a las necesidades del usuario. Con esta premisa, el diseño y la realización de pruebas que simulen situaciones reales que proporcionen indicadores para la adaptación al usuario de esas asistencias técnicas son primordiales para su éxito. Es por ello que desde hace años se persigue como desafío el desarrollo de métodos de evaluación de las capacidades motoras y cognitivas que faciliten el proceso de elección de los sistemas de ayuda técnica adecuados.

Recientemente, se han ido incorporando diferentes tecnologías al ámbito de la ingeniería de la

rehabilitación. Para el caso particular de personas con movilidad reducida en silla de ruedas, son varios los grupos de investigación que han estado trabajando en prototipos de simuladores de sillas de ruedas con el objetivo antes mencionado (consúltese, por ejemplo, [2-10, 12, 16], o las revisiones [1,15]).

Este artículo describe el proceso de integración de diversos equipos disponibles en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura para la creación de mundos virtuales para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas. Conviene resaltar que con el objetivo final de este trabajo es, en un futuro, el diseño y la fabricación de ayudas técnicas que permitan mejorar la calidad de vida de este tipo de personas. Además se pretende que el sistema sirva de ayuda en la fase de diseño de las infraestructuras de edificios que permitan una mejor adaptación para los usuarios en silla de ruedas. Estos equipos fueron adquiridos e instalados en el ámbito del proyecto “Centro de Tecnificación del Deporte Paralímpico” (DEPATech).

El resto del artículo está estructurado como sigue. El apartado 2 describe los principales equipos del simulador. El apartado 3 está dedicado a los procesos de integración de la estación de trabajo con el sistema de captura óptico, la plataforma de movimiento y el sistema háptico, el casco de realidad virtual mediante Unity para la creación de los mundos virtuales. El apartado 4 muestra el proceso de integración mediante una de las escenas desarrolladas. Las conclusiones de este trabajo, así como líneas de trabajo futuro, se resumen en el apartado 5.

2 EL SIMULADOR

El simulador está integrado por los siguientes equipos (véase un esquema de cómo están relacionados en la Figura 1):

- una estación de trabajo;
- una interfaz con la silla de ruedas, formada por una plataforma de movimiento, otra háptica para la silla y elementos de acceso;

- sistemas de captura corporal óptico y guante de datos;
- dispositivos de visualización, en concreto, una pantalla 3D y un casco de realidad virtual.

A continuación, se dan algunos detalles de cada uno de ellos.



Figura 1: Equipos que integran el simulador

2.1 ESTACIÓN DE TRABAJO

La estación de trabajo es el componente principal del simulador, esencial para su funcionamiento, ya que hace posible la comunicación con todos los equipos, es decir, tanto el envío como la recepción de datos. La aplicación para la gestión del simulador se ha desarrollado en Unity, software que permite incorporar fácilmente modelos de mundos virtuales e interactuar con ellos [17]. Asimismo, este software permite el manejo de cualquier dispositivo hardware que tenga las correspondientes librerías de programación, gracias a la posibilidad de introducir scripts en lenguaje C#.

Es importante resaltar que la potencia gráfica de este PC limita el nivel de detalle o la complejidad de los mundos virtuales que se diseñen. Además, si se desea gestionar simultáneamente varias salidas de visualización (monitor, pantalla 3D y casco de realidad virtual) es recomendable que la tarjeta gráfica que lleve instalada tenga esa funcionalidad. En el simulador se utilizan simultáneamente dos tarjetas gráficas: Nvidia GTX970 y Nvidia Quadro K5200.

2.2 INTERFAZ CON LA SILLA DE RUEDAS

Como se ha comentado, la interfaz con la silla de ruedas está constituida por una plataforma de movimiento y un sistema háptico. Existen muchos tipos y modelos de sillas de ruedas. Dada la aplicación considerada en este trabajo, la silla de

ruedas utilizada es la deportiva modelo *All Court* de Quickie.

La plataforma de movimiento es una plataforma de seis grados de libertad que permite transmitir al usuario las aceleraciones a las que es sometido como efecto de los movimientos que se produzcan en el mundo virtual (véase la Figura 2(a)). También permite reproducir las diferentes inclinaciones del terreno del mundo virtual sobre el que se está desplazando el usuario.

La plataforma dispone de un sistema háptico formado por dos cilindros actuados por motores. Estos cilindros sirven como interfaz del sistema con la silla de ruedas. La silla debe colocarse de forma que las ruedas estén en contacto permanente con los cilindros. Éstos tienen una doble función. Por un lado, detectar la intención del movimiento del usuario (los cilindros se accionan cuando el usuario mueve las ruedas). Y por el otro, emular las condiciones de la superficie del mundo virtual con el movimiento de los rodillos. Es decir, en función de la inclinación y tipo de superficie del mundo virtual en el que se encuentre, el usuario puede incluso notar mayor o menor facilidad a la hora de mover las ruedas.

La estación de trabajo es la encargada de medir y procesar el movimiento de los rodillos, así como de generar la rotación a los rodillos que se corresponda con la que experimenta las ruedas de la silla de ruedas virtual. La comunicación entre la estación de trabajo y ambas plataformas se realiza a través de un router con conexión Gigabit Ethernet, utilizando el protocolo TCP. La interacción entre el mundo virtual y ambas plataformas se gestiona desde un script en Unity.

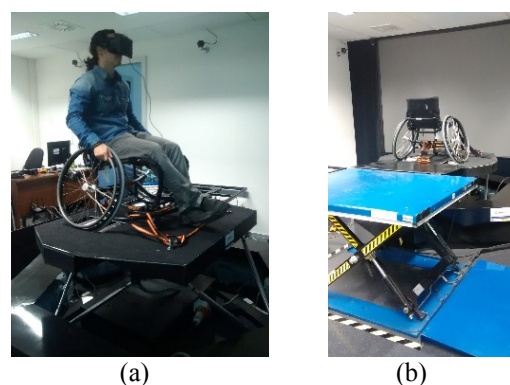


Figura 2: Plataforma de movimiento: (a) Usuario con casco de realidad virtual (b) Elementos de acceso a la plataforma

Cabe mencionar también que la plataforma dispone de un elevador automático con rampas para facilitar el acceso del usuario en silla de ruedas al simulador (Figura 2(b)).

2.3 SISTEMAS DE CAPTURA

El simulador dispone de un sistema para capturar los movimientos del usuario (véase la Figura 3), formado por un sistema óptico, para obtener las medidas del movimiento de todo el cuerpo de la marca Optitrack [13] y un guante de datos de 5DT, para registrar el movimiento de los dedos. Este sistema tiene una doble función: 1) registrar datos para su posterior procesamiento, análisis y estudio con objeto de diagnosticar posibles problemas o conductas erróneas en el usuario; y 2) mejorar la sensación de inmersión del usuario, ya que éste ve que su avatar se mueve de forma sincronizada con el movimiento de su cuerpo.

El software para el control del sistema de captura de Optitrack es Motive [14]. Este software permite la calibración y configuración del sistema y proporciona interfaces que permiten a su vez la captura y el procesamiento de datos 3D. Además, también permite realizar una emisión (streaming) de los datos capturados a través de la red, que ofrece, a su vez, la posibilidad de transferirlos al avatar del mundo virtual mediante Unity y C# Script.

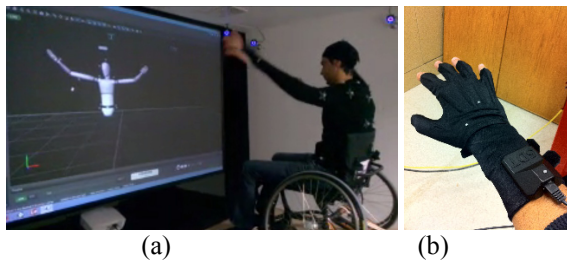


Figura 3: Sistemas de captura: (a) Sistema óptico de captura corporal (b) Guante de datos

2.4 SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN

En lo relativo a la visualización del mundo virtual, el simulador dispone de una pantalla 3D de grandes dimensiones y un casco de realidad virtual Development Kit 2 (DK2) de Oculus Rift [11], mostrado en la Figura 4. El usuario de la silla de ruedas utiliza el casco para que, gracias a la inmersión, pueda desempeñar sus rutinas de movimiento como acostumbra a realizarlas en el mundo real. Por otro lado, la pantalla 3D permite al equipo técnico observar en todo momento cómo está actuando el usuario y, de esta manera, darle las órdenes pertinentes.



Figura 4: Casco de realidad virtual Development Kit 2 (DK2) de Oculus Rift con marcadores

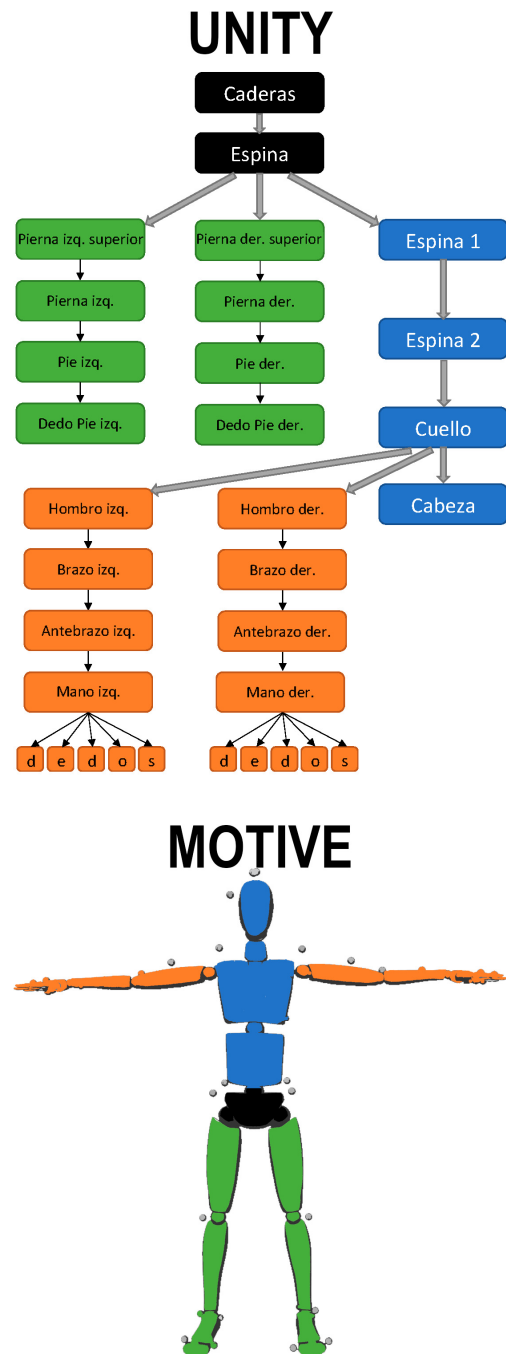


Figura 5: Correspondencia, representada con colores, entre la jerarquía del esqueleto del avatar de Unity y el esqueleto de Motive

3 INTEGRACIÓN DE EQUIPOS EN EL MUNDO VIRTUAL

Este apartado describe los procesos de integración de la estación de trabajo con el sistema de captura óptico, la plataforma de movimiento/sistema háptico y el casco de realidad virtual mediante Unity con objeto de crear los mundos virtuales para el simulador.

3.1 SISTEMA DE CAPTURA ÓPTICO

El proceso de integración del sistema de captura corporal óptico OptiTrack con Unity se ha realizado mediante el plugin que proporciona el fabricante [13] siguiendo los siguientes pasos:

1. Definición en Motive de un esqueleto, utilizando uno de los preconfigurados (*full body* de 27 marcadores).
2. Activación de la transmisión de datos en streaming desde Motive mediante protocolo Multicast.
3. Carga del plugin en Unity y asignación del script a un esqueleto de Unity que ha de tener una estructura jerárquica determinada, como la mostrada en la Figura 5.
4. Enlace entre el esqueleto Unity y el esqueleto Motive (se les debe asignar el mismo nombre).

3.1.1 Adaptación entre sistemas de referencia

Un paso fundamental para que la conexión entre ambos programas funcione es estudiar las relaciones entre los sistemas de coordenadas que usa cada uno y establecer un proceso de adaptación entre ambos.

El software de captura, dada la distribución física del sistema de cámaras, fija el origen del sistema de referencia en el centro del volumen de captura, Σ_{captura} (Figura 6(a)). Este punto se corresponde con la posición inicial del avatar, Σ_{avatar} , dentro del sistema de coordenadas de Unity (Figura 7).

En la aplicación que se plantea en este artículo ha de conseguirse que, una vez lanzada la simulación, si el usuario está en medio de la sala, en cualquier punto del volumen de captura de Optitrack, cuando se desplace físicamente sobre la silla de ruedas real, el avatar virtual que aparece en Unity ha de sentarse también justo encima de la silla virtual. Esto requiere de dos pasos fundamentales:

1. Cambio del origen de coordenadas del volumen de captura en Motive, situándolo en el centro de gravedad de la silla. Para ello, ha de medirse la distancia entre el centro de gravedad de las cámaras, Σ_{captura} , y el punto de la silla de ruedas real que coincide con el punto dónde se ubica en Unity el centro de gravedad de la silla de ruedas virtual, Σ_{silla} . Esta distancia es la se aplicará como offset al sistema de referencia de Motive (Figura 6(a)), con lo que el nuevo sistema de referencia estará ubicado donde se muestra en la Figura 6(b).
2. Como puede verse en la Figura 7(a), en Unity, inicialmente, avatar y silla de ruedas tienen sus respectivos centros de gravedad, Σ_{avatar} y Σ_{silla} ,

con respecto al sistema de referencia de Unity, Σ_{Unity} . En primer lugar, al avatar se le hará depender de la silla de ruedas, para que su sistema de referencia absoluto sea Σ_{silla} (Figura 7(b)). Seguidamente, se desplazará el avatar a su nuevo origen de coordenadas, dando lugar a que Σ_{avatar} y Σ_{silla} sean coincidentes (Figura 7(c)).

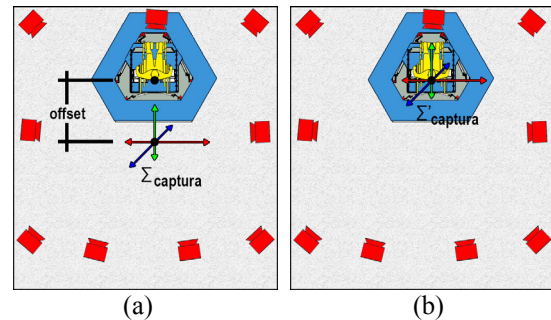


Figura 6: Desplazamiento del sistema de referencia en el programa de captura Motive: (a) Sistema de referencia inicial, Σ_{captura} , y distancia entre Σ_{captura} y el centro de gravedad de la silla de ruedas (Offset) (b) Nuevo sistema de referencia para el programa de captura, Σ'_{captura} (En rojo se representan las 9 cámaras del sistema de captura, en azul, la plataforma de movimiento y, en amarillo, el usuario sobre la silla de ruedas)

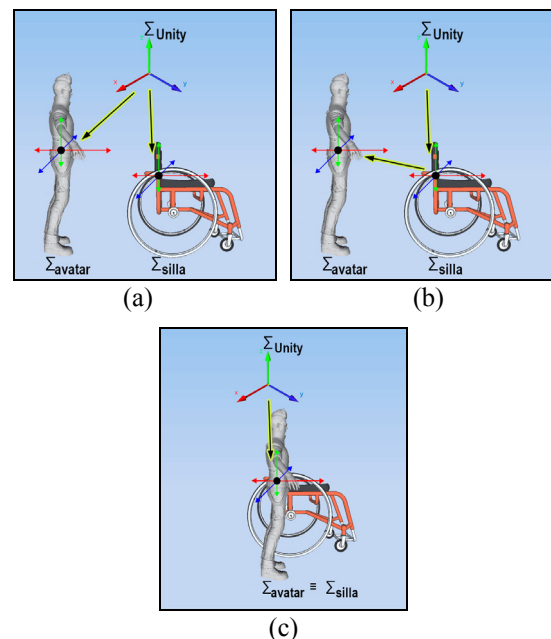


Figura 7: Asignación de sistemas de referencia en Unity: (a) Coordenadas del avatar, Σ_{avatar} , y de la silla de ruedas, Σ_{silla} , ubicados en sus centros de gravedad, con respecto al sistema de referencia de Unity, Σ_{Unity} (b) Asignación del centro de gravedad de la silla como sistema de referencia principal del avatar (c) Desplazamiento del avatar a su nuevo origen de coordenadas, Σ_{silla}

3.2 PLATAFORMA DE MOVIMIENTO Y SISTEMA HÁPTICO

A continuación, se va a describir el método para la integración de la plataforma y la silla de ruedas en el entorno de Unity.

3.2.1 Modelado de la plataforma en Unity

Unity incorpora un motor de físicas, basado en PhysX [18], que analiza en tiempo real las interacciones físicas entre los elementos debido al contacto entre ellos y la fuerza gravitatoria [17]. Para controlar la plataforma desde Unity, se ha desarrollado un script que permite la comunicación bidireccional entre Unity y la misma, de acuerdo con el esquema de la Figura 8, con dos funciones principales:

1. Detectar los movimientos que realiza la silla en Unity, así como las aceleraciones que experimente el modelo virtual y transmitirlos a la plataforma. A modo de ejemplo, si la silla está bajando una rampa de 30° de inclinación en Unity, la plataforma se inclinará 30° hacia delante en la realidad.
2. Capturar las órdenes de movimiento que da el usuario, es decir, el ángulo y la velocidad de giro de cada una de las ruedas, a través del sistema de rodillos de la plataforma. Estas órdenes son trasladadas automáticamente a la representación visual de Unity que, como es lógico, tiene directamente un efecto sobre el mundo que está procesando el motor de físicas de Unity.

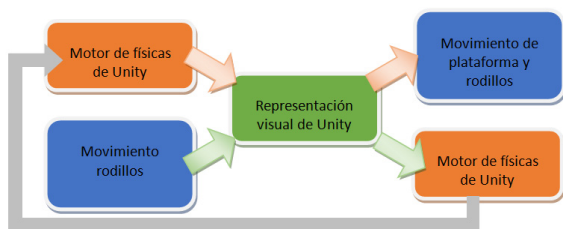


Figura 8: Esquema de la comunicación bidireccional entre la plataforma de movimiento y Unity

El script desarrollado permite la configuración de una serie de parámetros, tanto de la plataforma como del mundo virtual, entre los que cabe destacar:

- *'Platform Config File'*: archivo externo xml en el que se fijan los parámetros de configuración de la plataforma, tales como la velocidad de los motores.
- *'Right / Forward / Up Linear or Angular Scale'*: escala lineal o angular del eje derecho, delantero o superior, respectivamente.
- *'Factor 1'*: factor por el que se multiplica la velocidad de la silla cuando se desliza por una

pendiente. Valores positivos simulan una resistencia al movimiento baja, mientras que valores negativos, alta.

- *'Factor 2'*: factor por el que se multiplica la velocidad transmitida desde los dos rodillos hacia la silla virtual. Nótese que seleccionando valores negativos de este factor es posible invertir el sentido del movimiento, mientras que, si se elige un valor nulo, la silla virtual no se mueve.
- *'Factor 3'*: multiplicador de la velocidad de los rodillos. Para valores negativos, este factor puede usarse como factor de rozamiento de la silla sobre la superficie en la que se está desplazando. Al contrario, si se elige un valor positivo, podrá usarse como rozamiento negativo, como el que podría haber en el caso de una superficie helada.

Cabe resaltar que se ha creado un método para configurar la interacción entre el mundo virtual y el sistema de rodillos, mediante el cual se asignan diferentes valores a los factores 1, 2 y 3 para caracterizar diferentes tipos de superficies en el mundo virtual, tales como pista, hierba, arena y neutra, que básicamente se diferencian por tener diferentes coeficientes de rozamiento. Este método hace posible que, al paso de la silla de ruedas por cada tipo de suelo, el comportamiento de los rodillos emule el rozamiento de la silla con la superficie en cuestión. Por el momento, el ajuste de estos parámetros se ha hecho de forma empírica y con valores ilustrativos de suelos con grandes diferencias en sus coeficientes de rozamiento con el objeto de poder percibir las diferencias de comportamiento del sistema háptico.

Con respecto a la sincronización entre los movimientos virtuales y los reales de la plataforma, no se observan retardos en los tiempos de respuesta, incluso habiendo seleccionado una velocidad de los motores por debajo de la máxima en *'Platform Config File'*. Evidentemente, conviene señalar que, respecto a los movimientos de la plataforma, ésta simulará los de la silla de ruedas virtual con la limitación que imponen las dimensiones y relaciones entre los elementos mecánicos que la forman.

3.2.2 Modelado de la silla de ruedas en Unity

Para la representación de la silla de ruedas en Unity es necesario tener en cuenta dos cuestiones. Por un lado, es importante el modelado tridimensional de la silla de ruedas con sus correspondientes propiedades (dimensiones, materiales, centro de gravedad, material de contacto con el suelo), que tendrán su efecto dentro del motor de físicas de Unity. Por otro lado, cualquier diseño que se elija se ha de estructurar según el esquema básico representado en

la Figura 9. Como puede observarse, el modelo básicamente se divide en un chasis y las dos ruedas principales motrices. A cada uno de estos elementos se le ha de asociar la propiedad denominada *collider*, que hace que el objeto sea tenido en cuenta dentro del motor de físicas. En concreto, a cada *collider* se le ha de dar una forma y dimensiones, es decir, el *collider* define la envolvente del modelo 3D al que se le asocia, a partir de la cual se efectuarán los cálculos para las colisiones entre objetos.

En concreto, para las aplicaciones iniciales con este simulador se ha creado el modelo de la silla que se muestra en la Figura 10. Se ha definido un *collider* cúbico para el chasis y dos *colliders* específicos para ruedas de Unity.

3.3 CASCO DE REALIDAD VIRTUAL

Para el casco de realidad virtual, se ha instalado la versión 0.8 del kit de desarrollo de software (SDK en inglés) de Oculus Rift en la estación de trabajo. La integración del casco en Unity se ha hecho mediante la versión 1.13 del plugin proporcionado por Oculus Rift, disponible en [11].

Aunque este plugin soluciona perfectamente la integración del casco en Unity, conviene resaltar que para el posicionamiento absoluto del casco se ha decidido no utilizar la cámara externa que incorpora el Oculus DK2. Para la aplicación particular de este simulador, el rango de detección (distancia máxima con respecto a la cámara y ángulo de visión) que ofrece esta cámara es muy limitado. Por tanto, para el posicionamiento absoluto, se ha decidido utilizar el sistema de captura óptico. En concreto, se han adherido 6 marcadores ópticos al casco de realidad virtual, distribuidos asimétricamente, como se muestra en la Figura 4. Se decide emplear esta distribución con el objeto de que se pueda diferenciar perfectamente hacia dónde está mirando el usuario.

Los pasos seguidos para la integración del casco en Unity son los siguientes:

1. Carga del plugin de Oculus en la escena de Unity.
2. Cambio de la versión de DirectX a DirectX11 en las propiedades del proyecto de Unity, al tratarse de un casco con cierta antigüedad.
3. Asignación del script del controlador del casco a la cabeza del avatar.
4. Desactivación de la funcionalidad de posicionamiento absoluto.
5. Creación en Motive de un sólido rígido definido por los 6 marcadores adheridos al casco.
6. Activación de la transmisión de datos en streaming desde Motive.

7. Carga del plugin de Optitrack en Unity y asignación del script de sólido rígido a la cabeza del avatar.
8. Conexión del sólido de Unity con el sólido de Motive (se les debe asignar el mismo nombre).
9. Comprobación del seguimiento y visualización con el casco.

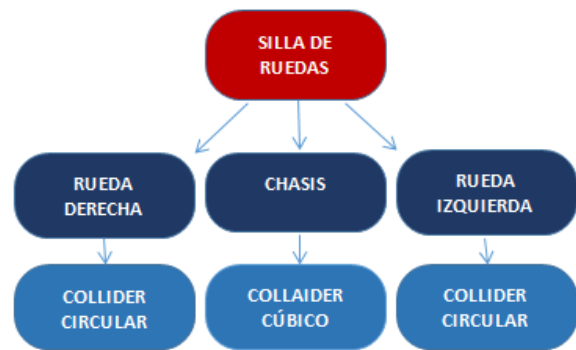


Figura 9: Estructura básica del modelo de la silla de ruedas en Unity



Figura 10: Modelo 3D de la silla de ruedas empleada en la aplicación desarrollada

4 EJEMPLO DE MUNDO VIRTUAL DESARROLLADO

En este apartado está dedicado a la aplicación que se ha desarrollado para el simulador a modo de ejemplo.

El ejemplo desarrollado se trata de una aplicación básica que resuelve el problema de la integración de todos los dispositivos del simulador y que puede servir como base para el diseño de entornos más complejos.

En primer lugar, se ha decidido añadir la funcionalidad de poder ejecutar la simulación con o sin captura de movimiento óptica y con pantalla o casco de realidad virtual, tal y como puede apreciarse en el menú inicial que aparece al lanzarse la aplicación, mostrado en la Figura 11.

Como se ha descrito anteriormente, el funcionamiento del simulador requiere la ejecución simultánea del software de captura óptico Motive y

de la simulación compilada a partir de Unity. La Figura 12 muestra una captura realizada durante la ejecución del simulador. En la Figura 12(a), puede verse cómo un usuario con el traje de captura y el casco de realidad virtual maneja el simulador, es decir, interacciona con la silla de ruedas real. Y en la Figura 12(b) y (c) se representa lo que ve el usuario en el casco de realidad virtual y el software Motive mientras captura los movimientos del usuario, respectivamente.

La aplicación básica que se ha diseñado se trata de un entorno pequeño de una ciudad con algunas calles y una pista de pruebas. La pista consta de diversos obstáculos y rampas de subida y bajada. Además, en una sección de la pista, cuyo suelo tiene un coeficiente de rozamiento, se han introducido otros 3 tipos de suelo (Figura 13), con coeficientes de rozamiento dispares, para probar el efecto del tipo de suelo sobre los rodillos del simulador.

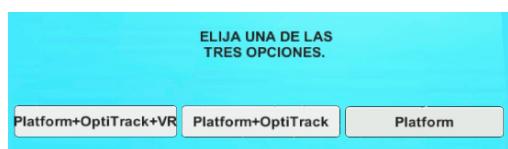


Figura 11: Menú principal de la aplicación desarrollada

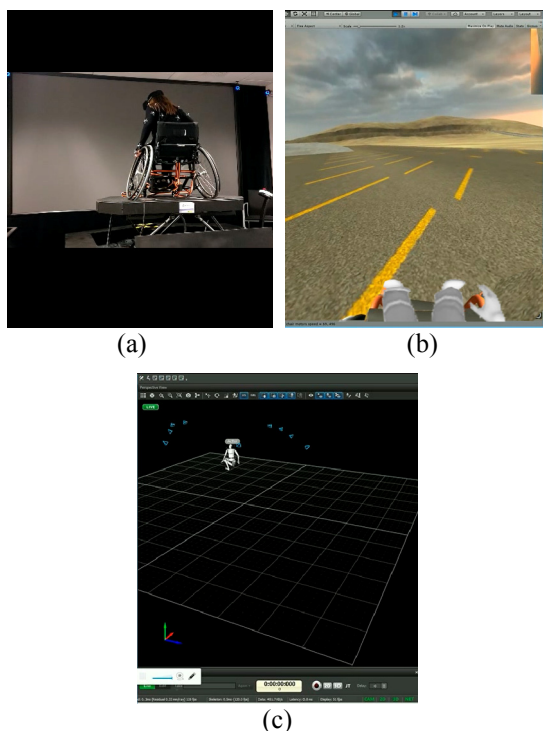


Figura 12: Simulador de movimiento en funcionamiento: (a) Usuario sobre la silla de ruedas del simulador con el traje de captura y casco de realidad virtual (b) Perspectiva del usuario del mundo virtual (c) Software Motive capturando datos

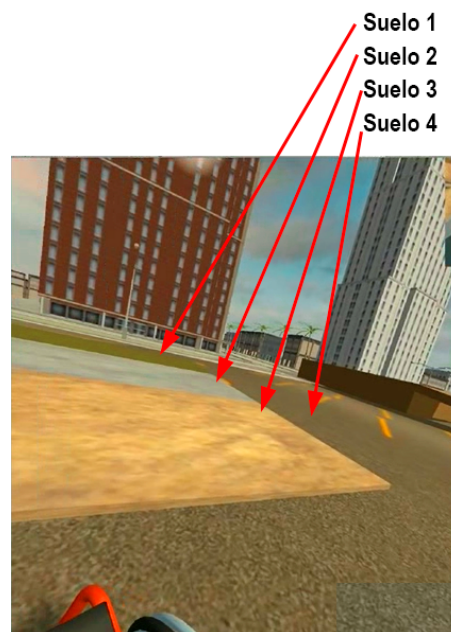


Figura 13: Diferentes tipos de suelo modelados en la aplicación desarrollada para el simulador

5 CONCLUSIONES

Este artículo ha descrito el proceso de integración de equipos de un simulador de movimientos para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas con el objeto de, en un futuro, mejorar su calidad de vida. En esencia, el simulador consta de una plataforma de movimiento con un sistema háptico de rodillos, un sistema de captura de movimientos y un casco de realidad virtual.

Se ha desarrollado una aplicación básica simple para el uso simultáneo de esas tecnologías. En esta aplicación se han modelado empíricamente diferentes tipos de suelo que afectan a la experiencia del usuario que se desplaza con la silla de ruedas sobre esos suelos virtualmente.

Como trabajos futuros se plantean los siguientes: 1) pruebas de rendimiento de las comunicaciones entre la estación de trabajo y el resto de equipos; 2) comprobación de las diferencias entre las transformaciones del mundo virtual y las aplicadas a la plataforma de movimiento; 3) creación de una tabla que sirva para relacionar las condiciones físicas de superficies con los valores de los parámetros 'Factor 1', 'Factor 2' y 'Factor 3' del script desarrollado y que permitan simular de forma precisa el rozamiento con esas superficies; y 4) integración de un guante de datos en el mundo virtual.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondos FEDER (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020), a través de la Ayuda a Grupos de la Junta de Extremadura con número de expediente GR15178, y por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto con referencia DPI2016-80547-R.

Parte del equipamiento utilizado en este trabajo fue adquirido gracias al Programa Operativo FEDER de I+D+i por y para el Beneficio de las Empresas-Fondo Tecnológico 2007-2013 del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto "Centro de Tecnificación del Deporte Paralímpico" (DEPATech).

Referencias

- [1] Abellard, P., Randria, I., Abellard, A., Ben Khelifa, M. M., Ramanantsizehena, P., (2010) "Electric Wheelchair Navigation Simulators: why, when, how?", *Mechatronic Systems Applications*, A. M. Donato Di Paola and G. Cicirelli (Ed.), InTech.
- [2] Advanced Multimodal Room for Interaction in Virtual Reality. Online: <https://www.lst.tfo.upm.es/virtual-reality-room/>
Consultado el día: 04/06/2016
- [3] Crichlow, L. R., Fernie, G. R., Campos, J. L., Grant, P. R., (2011) "A Full Motion Manual Wheelchair Simulator For Rehabilitation Research", *Proc. 2011 RESNA/ICTA Conference - Advancing Rehabilitation Technologies for an Aging Society*.
- [4] Fernández-Panadero, C., Cruz Barquero, V., Morán Núñez, D., Delgado Kloos, C., (2014) "PhyMEL-WS: Physically Experiencing the Virtual World. Insights into Mixed Reality and Flow State on Board a Wheelchair Simulator", *Journal of Universal Computer Science*, 20(12):1629-1648.
- [5] Fernández-Panadero, C., Cruz Barquero, V., Morán Núñez, D., Delgado Kloos, C., (2013) "PhyMEL-WS Wheelchair Simulator: A Preliminary Study to Increase Awareness about the Problems of Living the City in a Wheelchair", *Proc. 3rd European Immersive Education Summit*, pp. 210-221, UK.
- [6] Grant, M., (2003) "Wheelchair Simulation in Virtual Reality". Online: <https://pdfs.semanticscholar.org/a500/757b5624a69d9dd2901110554102a5109a70.pdf>
Consultado el día: 04/06/2016
- [7] Harrison, C. S. and Grant, P. M. and Conway, B. A., (2010) "Enhancement of a virtual reality wheelchair simulator to include qualitative and quantitative performance metrics", *Assistive Technology*, 22(1): 20-31.
- [8] John, N. W., Pop, S. R., Day, T. W., Ritsos, P. D., Headleand, C. J., (2017) "The Implementation and Validation of a Virtual Environment for Training Powered Wheelchair Manoeuvres", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, In Press.
- [9] Mahajan, H. P., Dicianno, B. E., Cooper, R. A., Ding, D., (2013) "Assessment of wheelchair driving performance in a virtual reality-based simulator", *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 36(4):322-332.
- [10] Niniss, H., Inoue, T., (2006) "Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability", *Proc. National Rehabilitation Centre for Persons with Disabilities Conference*, Japón.
- [11] Oculus Rift. Online: <https://www.oculus.com/rift/>
Consultado el día: 04/06/2016
- [12] Onyango, S. O., Hamam, Y., Djouani, K., Daachi, B., Steyn, N., (2016) "A Driving Behaviour Model of Electrical Wheelchair Users", *Computational Intelligence and Neuroscience*, 7189267.
- [13] OptiTrack. Online: <http://optitrack.com>
Consultado el día: 04/06/2016
- [14] OptiTrack. Motive documentation. Online: http://wiki.optitrack.com/index.php?title=Motive_Documentation
Consultado el día: 04/06/2016
- [15] Pithon, T., Weiss, T., Richir, S., Klinger, E., (2009) "Wheelchair simulators: A review", *Technology and Disability*, 21(1):1-10.
- [16] Steyn, N., Hamam, Y., Monacelli, E., Djouani, K., (2015) "Modelling and design of an augmented reality differential drive mobility aid in an enabled environment", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 51:115-134.
- [17] Unity. Online: <https://unity3d.com/es>
Consultado el día: 04/06/2016
- [18] Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/PhysX>
Consultado el día: 04/06/2016